

## **Estado del arte del proyecto: “Evaluación del potencial energético de la biomasa residual del procesamiento de la palma de aceite en Colombia.”**

**Autores: Vladimir Sousa Santos - Juan Barrera Hernández - Juan Cabello Eras - Alexis Sagastume Gutiérrez.**

### **Resumen:**

Históricamente la biomasa residual sólida de palma de aceite ha sido la fuente de energía por excelencia para satisfacer las necesidades energéticas del proceso de extracción de aceite de palma. La biomasa de palma obtiene una atención especial a lo que concierne a su disponibilidad, dada las características de un cultivo perenne, la biomasa se genera durante todo el año, siendo esta una de las principales barreras económicas de los proyectos de energía renovable a partir de biomasa. Colombia como país mayor productor de aceite de palma en América, generando cerca de 3 millones de toneladas de biomasa al año. Considerando los altos volúmenes de producción de biomasa en Colombia, este estudio propone evaluar el potencial energético de la biomasa residual sólida con énfasis en plantas de generación de energía descentralizadas. La primera parte del estudio concierne a la revisión de las características fisicoquímicas de la biomasa residual de palma de aceite. Se desarrolla un inventario de biomasa para determinar los volúmenes de producción de biomasa en las distintas zonas palmeras. Se incluye la realización de un inventario de tecnologías de conversión energética maduras comercialmente, con base a la información recolectada se estructuran los escenarios de evaluación considerando las tecnologías existentes. Finalmente se evalúa el potencial energético acorde a la eficiencia de los procesos, el costo de generación de energía y la mitigación de gases de efecto invernadero frente al consumo de fuentes fósiles.

### **Marco teórico:**

Industria palmera internacional y nacional. El aceite de palma africana (*Elais Guineensis* Jacq.), es un cultivo perenne tropical de cuyos frutos se extraen dos aceites (aceite rojo y aceite de palmiste). Ambos aceites son comestibles y son ampliamente utilizados en la elaboración de muchos alimentos procesados, oleo químicos, productos médicos, productos para el hogar, y productos industriales (Corley et al., 2003). El cultivo de palma de aceite es el de mayor rendimiento de aceite por hectárea cultivada, produciendo hasta 10 veces más que otras oleaginosas, con una producción de 58.431 millones de ton por año ((USDA, 2018)). Los aceites obtenidos de la palma de aceite son demandados industrialmente por su alta versatilidad para la producción de diferentes productos ((Mba et al., 2015)). La industria alimenticia utiliza cerca del 90 % del aceite de palma producido, mientras que el 10 % restante se utiliza en productos como el jabón, los oleo químicos etc. (Daud et al., 2012). El fraccionamiento del aceite crudo produce oleína de palma (fracción líquida) y esterina (fracción sólida). Estas fracciones tienen distintas propiedades químicas y físicas. El aceite crudo de palma, la oleína y la esterina son componentes importantes de diferentes alimentos y productos industriales como grasas hidrogenadas, helados, cosméticos, lubricantes, pasta dental y biodiesel (Mba et al., 2015). En particular, Indonesia y Malasia producen el 84% de la producción global de aceite de palma, lo que incide en que las estrategias comerciales estén marcadas por las políticas de estos países ((Hashim et al., 2012)). Mientras que Colombia es el primer productor de aceite de palma en América, y el tercer productor mundial (Fedepalma, 2018). La producción de aceite de palma en Colombia se divide en cuatro zonas palmeras: • Zona Norte • Zona Central • Zona Sur • Zona Occidental

SurOccidental Productos, subproductos y residuos de la extracción de aceite de palma. En promedio, el rendimiento de aceite de palma por hectárea en Colombia ronda las 3.6 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Fedepalma, 2018). La densidad de siembra de palmas de aceite es de 143 y 128 por hectárea para materiales Guineensis e híbridos respectivamente. Requiere cerca de tres años para iniciar su periodo productivo, alcanzando una estabilidad productiva a los 7 años (Corley et al., 2003). El ciclo productivo de la palma de aceite alcanza los 25 años, donde las palmas son erradicadas debido a la dificultad de cosechar los frutos a más de doce metros de altura (Ramirez-Contreras et al., 2011). Estudios señalan que la cantidad de troncos y hojas dejados durante la erradicación, expresado en base seca, es de 86.6 t ha<sup>-1</sup> y 16.5 t ha<sup>-1</sup> respectivamente, considerando una densidad de siembra de 143 hectáreas con una edad de 29 años (García-Núñez, Ramirez-Contreras, et al., 2016a). Los racimos de fruto fresco (RFF) cosechados son la materia prima utilizada en las plantas de beneficio para extraer los dos productos comerciales principales: aceite crudo de palma (ACP) y aceite de palmiste (APL). Dado que la biomasa agrícola generada en campo como el estípite y las hojas son usadas en campo, este estudio solo se enfoca en la biomasa generada en el proceso de extracción de aceite de palma. La biomasa residual sólida comprende tres tipos: la tusa, el cuesco y la fibra del mesocarpio. En promedio se extrae el 21% del aceite contenido en los racimos de fruto fresco, una fracción del aceite permanece impregnada de la biomasa. La pérdida de aceite impregnada en la biomasa es un indicador de producción que se monitorea para determinar la eficiencia del proceso (Montero V et al., 2013). La biomasa sólida de aceite de palma es un material lignocelulósico que se compone por tres polímeros mayores: celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas. La Tabla 2 presenta los rangos de variación de la composición de la biomasa residual discutida por diferentes autores. Dado que la lignina tiene una fuerte relación con el poder calorífico, el cuesco y la fibra suelen ser los preferidos para ser seleccionado como campo de estudio para aplicaciones termoquímicas. Por otra parte, la tusa puede ser usada alternativamente como materia prima de bioprocesos debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa. La Figura 8 muestra el análisis próximo de la biomasa residual de la producción de aceite de palma. En general, la biomasa residual de la producción de aceite de palma tiene altos contenidos de material volátil, lo que la hace apta para procesos de gasificación y torrefacción (Dai et al., 2019). La humedad afecta el poder calorífico de la biomasa, lo que incide en la selección de la tecnología de revalorización energética (M. K. A. Aziz et al., 2011). La Figura 9 muestra las correlaciones entre poder calorífico y humedad de la biomasa residual de la producción de aceite de palma (Demirbas, 2007; Sokhansanj, 2011). La Figura 8 muestra el análisis elemental de la biomasa residual de la producción de aceite de palma. Uso de la biomasa y disponibilidad Tradicionalmente la tusa obtenida del proceso es colocada en campo como práctica agrícola para la preservación de la humedad en el suelo y como material aportante de nutrientes. Sin embargo, el uso de tusa en el campo requiere de un manejo especializado dado el alto riesgo de proliferación de moscas por la descomposición de la tusa, trayendo así problemas de salubridad en comunidades aledañas al cultivo. De acuerdo con el inventario de biomasa sólida realizado en Colombia en el 2015, la biomasa residual tiene diferentes aplicaciones. Dado el contenido nutricional de la tusa, este material ha sido acogido por sistemas de compostaje como alternativas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el manejo de lixiviados y el uso de combustibles fósiles usados en el proceso son puntos críticos.

#### **Estado del arte:**

Bioenergía Existen diferentes rutas tecnológicas de conversión de biomasa en energía útil. La bioenergía puede ser suministrada en estado sólido, gaseoso o combustible líquido y principalmente

es usado para generar calor, así como electricidad y/o portadores energéticos. Su amplio campo de aplicación es una de las principales razones por el crecimiento constante de energía generada de la biomasa. Principalmente se distinguen tres rutas de conversión: termoquímica, fisicoquímica y biológica. Los procesos de conversión termoquímica de biomasa incluyen: combustión, pirolisis y gasificación (Rincon Martinez et al., 2015). La conversión físico química puede ser aplicada en la producción de biocombustibles (Taylor, 2008). La conversión biológica de la biomasa se usa para la producción de biogás o bioetanol (Nanda et al., 2014). La Figura 6 muestra las diferentes rutas de conversión. La ruta termoquímica es la más común y ajustada para biomasa sólida (Basu, 2006; Nanda et al., 2014; Van Loo, 2008). Por aspectos técnicos y ambientales, la biomasa es apta para sustituir combustibles sólidos especialmente en el sector de generación de electricidad, donde existe un auge en el desarrollo de tecnologías comerciales para proyectos descentralizados con capacidades inferiores a 2 MW (Strzalka et al., 2017). La gasificación es una tecnología aún requiere superar barreras técnicas para su comercialización, aún existen dificultades desde el suministro de biomasa hasta la utilización final del gas combustible (Asadullah, 2014). Los sistemas de conversión de biomasa por pirolisis tienen el potencial de ser comercializados, sin embargo aún existe una brecha entre el costos de producción del bioaceite y el costo de un combustible fósil que requiere consideraciones para hacerlo viable (Hu et al., 2019). De las rutas termoquímicas la más ampliamente usada es la combustión, más del 90% de la bioenergía depende de la combustión (Malico et al., 2019). Las tecnologías mencionadas son tecnologías de conversión primaria, lo cual convierte la biomasa sólida en calor o combustible. Cuando el calor es generado por la combustión, puede ser usado directa o indirectamente para convertirlo en electricidad. Por lo tanto, una tecnología de conversión secundaria es necesaria. En este proceso, no solo se genera electricidad, sino también calor de rechazo que puede ser utilizado por una instalación como fuente térmica de energía. Existen distintos tipos de conversión de energía disponibles (turbinas a vapor, motores a vapor, ciclos orgánicos de Rankine (ORC), motores Stirling, motores de combustión interna, turbina de gas y micro turbinas) y todas dependen de las tecnologías de conversión primarias. Tecnologías de conversión primaria Existen diferentes tecnologías de combustión de biomasa utilizadas para generar calor y electricidad con temperaturas de combustión entre los 800 – 1000 °C. La combustión puede aplicarse a fuentes de biomasa con humedades inferiores al 50 % (Shafie et al., 2012). En general, las tecnologías de combustión de biomasa se clasifican en (Wolf et al., 2013): Lecho fijo. Lecho fluidizado (la cual puede ser de lecho circulatorio o burbujeante). Combustible pulverizado. Los hornos de parrillas son equipos robustos con capacidad para quemar varios tipos de biomasa. Sin embargo, esta tecnología se caracteriza por su baja eficiencia y altas emisiones. El lecho fluidizado por otra parte, es la tecnología más versátil para la quema de biomasa, generando menores emisiones que las calderas de parrilla. La combustión por combustible pulverizado es la tecnología con mayores exigencias en cuanto a la calidad del combustible. En plantas de beneficio de aceite de palma, generalmente se utilizan sistemas de combustión de lecho fijo combinados con calderas acutubulares, pirotubulares o mixtas. Las calderas usadas en el sector han evolucionado hasta el punto de contar con sistemas que permiten una extracción fácil de cenizas. Inicialmente, las cenizas presentaban diferentes inconvenientes por la escorificación en las parrillas, reduciendo la eficiencia del sistema (Cala Gaitán et al., 2008) (Wambeck, 1999). En la actualidad, las calderas utilizan parrillas viajeras para facilitar la distribución de la biomasa en el horno. Sin embargo, hay varias plantas que siguen utilizando sistemas de lecho fijo donde la extracción de cenizas es manual, generando ineficiencias por combustible no quemados, pérdidas de energía y emisión de cenizas en los gases de escape. Actualmente se reportan eficiencias en calderas de biomasa de palma de aceite por el orden del 60 % y 75 % (Husain et al., 2002) (Abdullah et al., 2013) (Sommart et al., 2011). En general, el desarrollo de nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia de combustión de la biomasa se ha enfocado en mejorar el control de la humedad. En la actualidad, los sistemas de

combustión consumen cerca del 70 % de la biomasa generada (fibra y cuesco) por el proceso de extracción de aceite, mientras la tusa es usada excepcionalmente en estos sistemas (Ramirez-Contreras et al., 2015). La demanda térmica del proceso se encuentra por el orden de los 1343 MJ por tonelada de racimo de fruto fresco (RFF) (Monroy, 2007). Es decir, con estos valores y una eficiencia de térmica del 60 % escasamente se logra satisfacer la demanda. Para aumentar la biomasa disponible para la combustión, se han realizado estudios para incinerar los racimos de fruto vacíos en lecho fluidizado usando arena de alúmina, caliza y dolomita, con eficiencias térmicas preliminares del 99 % para excesos de aire del 40 % cuando se usa arena de alúmina o del 60 % cuando se usa caliza y dolomita (Ninduangdee et al., 2016). Otros estudios han determinado que utilizando tecnología FBC en un recipiente cónico para la quema de cuesco y tusa con un tamaño de partículas inferior a los 5 mm, se alcanzan eficiencias de combustión en el rango de 99.4 – 99.7 % manteniendo el exceso de aire entre 40 y 50 % (Ninduangdee et al., 2014)(Ninduangdee et al., 2015).

**Tecnología de conversión secundaria** Las tecnologías de conversión secundaria pueden ser clasificadas en aquellas donde los productos de la combustión pueden ser usados como fluido de trabajo (turbinas a gas) y aquellas donde hay un fluido secundario que actúa como fluido de trabajo (vapor) (Malico et al., 2019). La combustión directa de biomasa puede ser adaptada desde que los motores no sufran daños por partículas de ceniza y metales contenidos en los gases de combustión, siempre con su unidad de limpieza (Sikarwar et al., 2017).

**Turbinas de vapor** Actualmente los ciclos de vapor son la tecnología más utilizada en sistemas de cogeneración, se consideran la opción más barata y más segura (Börjesson et al., 2012). Debido a la disponibilidad de la biomasa y los altos costos de transporte de la biomasa, las plantas de cogeneración han sido desarrolladas a pequeña escala comparadas con plantas térmicas a carbón, por lo tanto las plantas comerciales se construyen entre los 100 kWe – 100 MWe (Malico et al., 2019; Strzalka et al., 2017). La eficiencia de las turbinas de vapor dependerá la capacidad instalada, grandes capacidades tienen relativamente alta eficiencias. La eficiencia eléctrica anual generalmente están por el rango de 18 – 30% para plantas entre 2 y 25 MW (Abbas et al., 2020). Según el estudio (Arrieta et al., 2007) el costo de implementación de un sistema de cogeneración con biomasa residual de palma de aceite se encuentra en un rango de 690 -850 US \$ /kW. Ciclo orgánico de Rankine Los ciclos orgánicos de Rankine son similares a los ciclos de vapor convencionales, con la excepción que utilizan mayoritariamente aceites siliconados como fluido de trabajo, lo que les permite la explotación de altas temperaturas disponibles de la combustión de biomasa (Guercio et al., 2017). Las plantas biomasa ORC están comercialmente disponibles para capacidades de hasta 8 MWe (Malico et al., 2019). Los sistemas biomasa-ORC tienen aspectos atractivos comercialmente debido a su adaptabilidad, baja inversión y costos de mantenimiento, mejor operación de carga parcial y mejor eficiencia eléctrica que las turbinas de vapor de la misma capacidad (Abbas et al., 2020; Strzalka et al., 2017). En la Tabla 6 muestra las eficiencias promedio para sistemas biomasa-ORC reportados por (Guercio et al., 2017).

**Motores Stirling** Un motor Stirling usa el calor de combustión para calentar directamente un fluido de trabajo gaseoso en el motor. Los motores Stirling son sistemas apropiados para pequeñas capacidades de hasta 100 kWe, con eficiencias eléctricas entre 15-30%(Malico et al., 2019). La electricidad generada y la relación de calor lo hace más apto para aplicaciones comerciales y residenciales (Abbas et al., 2020). (Gerssen-Gondelach et al., 2014) reporta costos de inversión entre 5800 – 9800 \$/kWe y eficiencias eléctricas entre el 9 -16%.

**Motores de combustión interna** Los gases de síntesis generados en el proceso de la gasificación pueden ser aprovechados energéticamente in situ por medio de un motor de combustión interna (Basu, 2018). El diseño de estos motores permite operar con las impurezas generadas en el gas. Sin embargo, los costos de operación y mantenimiento son altos. Su complejidad en la operación conduce a una lenta expansión a pesar de estar disponible comercialmente.

**Huella de carbono** La huella de carbono es la suma del secuestro y la emisión de gases de efecto invernadero durante un

periodo de tiempo, causados directa o indirectamente por un individuo, organización o producto. La huella de carbono es un indicador muy utilizado para evaluar la sostenibilidad de un proceso, y se ha utilizado en diversos estudios realizado en Colombia ((Ramirez-Contreras et al., 2020; Rivera-Méndez et al., 2017)). Colombia, por su volumen de producción de aceite de palma y por el uso de zonas anteriormente ganaderas para el cultivo de palma de aceite, tienen un potencial alto para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. El carbono almacenado en la biomasa de ecosistemas agrícolas de palma de aceite es de 118 t de Carbono por hectárea. La huella de carbono por tonelada de racimo de fruto fresco es de 606 kg de CO<sub>2</sub>eq. (Rivera-Méndez et al., 2017). Durante el cultivo del fruto de la palma de aceite, el cambio de uso del suelo representa el 13% de la huella de carbono, el transporte de la fruta el 15%, la energía del laboreo agrícola el 8% y el uso de pesticidas al 0.5%. Otras actividades contribuyen al 64% de la huella de carbono. En plantas de beneficio las emisiones se concentran en el tratamiento del POME por la emisión de metano (361 kg de CO<sub>2</sub>eq por ton de RFF), degradación de biomasa (188 kg de CO<sub>2</sub>eq por ton de RFF), cogeneración de electricidad (76 kg de CO<sub>2</sub>eq por ton de RFF), generador diésel (13 kg de CO<sub>2</sub>eq por ton de RFF), construcción de infraestructura (0.04 kg de CO<sub>2</sub>eq por ton de RFF), sustitución de electricidad fósil por renovable (-4.01 kg de CO<sub>2</sub>eq por ton de RFF) (García-Núñez, Rodríguez, et al., 2016).

#### **Bibliografía:**

Abbas, T., Issa, M., & Ilinca, A. (2020). Biomass Cogeneration Technologies: A Review. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 10(01), 1–15. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2020.101001>

Abdullah, N., & Sulaiman, F. (2013). The Oil Palm Wastes in Malaysia. In *Biomass Now - Sustainable Growth and Use* (Vol. 3, pp. 97–103). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.004>

Arrieta, F. R. P., Teixeira, F. N., Yáñez, E., Lora, E., & Castillo, E. (2007). Cogeneration potential in the Colombian palm oil industry: Three case studies. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.016>

Asadullah, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074>

Aziz, M. K. A., Morad, N. A., Wambeck, N., & Shah, M. H. (2011). Optimizing palm biomass energy through size reduction. 2011

4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, ICMSAO 2011, (APRIL). <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2011.5775516>

Aziz, M., Kurniawan, T., Oda, T., & Kashiwagi, T. (2016). Advanced power generation using biomass wastes from palm oil mills. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.031>

Basu, P. (2006). Combustion and Gasification in Fluidized Beds. In CRC Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Basu, P. (2018). Biomass characteristics. In Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>

Bevan Nyakuma, B., Johari, A., & Ahmad, A. (2013). Thermochemical analysis of palm oil wastes as fuel for biomass gasification. Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering), 62(3), 73–76. <https://doi.org/10.11113/jt.v62.1891>

Börjesson, M., & Ahlgren, E. O. (2012). Biomass CHP energy systems: A critical assessment. In Comprehensive Renewable Energy (Vol. 5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00508-4>

Caillat, S., & Vakkilainen, E. (2013). 9 – Large-scale biomass combustion plants: an overview. In Biomass Combustion Science, Technology and Engineering. <https://doi.org/10.1533/9780857097439.3.189>

Cala Gaitán, G., & Bernal Castillo, G. (2008). Procesos modernos de extracción de aceite de palma.

Chang, S. H. (2014). An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production. Biomass and Bioenergy, 62, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.002>

Comision de Regulacion de Energia y Gas CREG. (2018). Resolución No. 30. Mme, p. 13. Retrieved from [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/\\$FILE/Creg030-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/$FILE/Creg030-2018.pdf)

Congreso de la república de Colombia. Ley 1715 de 2014.

Corley, O. T., & Tinker, J. R. (2003). The Oil Palm. In West African Agriculture (pp. 93–104). <https://doi.org/10.1017/CBO9781316530122.010>

Dai, L., Wang, Y., Liu, Y., Ruan, R., He, C., Yu, Z., ... Tian, X. (2019). Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 107(January), 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.015>

Daud, Z. A. M., Kaur, D., & Khosla, P. (2012). 18 – Health and Nutritional Properties of Palm Oil and Its Components. Palm Oil, 545–560. <https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50021-6>

Demirbas, A. (2007). Effects of moisture and hydrogen content on the heating value of fuels. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 29(7), 649–655. <https://doi.org/10.1080/009083190957801>

Eras, J. J. C., Morejón, M. B., Gutiérrez, A. S., García, A. P., Ulloa, M. C., Martínez, F. J. R., & Rueda-Bayona, J. G. (2019). A look to the electricity generation from non-conventional renewable energy sources in Colombia. International Journal of Energy Economics and Policy, 9(1), 15–25. <https://doi.org/10.32479/ijeep.7108>

Fedepalma. (2016). Balance económico del sector palmero colombiano en 2015. Boletín Económico, 8. Retrieved from [http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/BTE\\_2016\\_en\\_baja.pdf](http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/BTE_2016_en_baja.pdf)

Fedepalma. (2018). Minianuario estadístico 2018. Retrieved from <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/anuarioestadistico2018-111018.pdf>

García-Nunez, J. A., Ramírez-Contreras, N. E., Rodríguez, D. T., Silva-Lora, E., Frear, C. S., Stockle, C., & García-Pérez, M. (2016a). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>

García-Nunez, J. A., Ramírez-Contreras, N. E., Rodríguez, D. T., Silva-Lora, E., Frear, C. S., Stockle, C., & García-Pérez, M. (2016b). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>

García-Nunez, J. A., Rodríguez, D. T., Fontanilla, C. A., Ramírez, N. E., Silva Lora, E. E., Frear, C. S., ... García-Pérez, M. (2016). Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. *Biomass and Bioenergy*, 95, 310–329. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.020>

Gerssen-Gondelach, S. J., Saygin, D., Wicke, B., Patel, M. K., & Faaij, A. P. C. (2014). Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40(April), 964–998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.197>

Gómez-Navarro, T., & Ribó-Pérez, D. (2018). Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(March), 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>

Guercio, A., & Bini, R. (2017). Biomass-fired Organic Rankine Cycle combined heat and power systems. In *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100510-1.00015-6>

Hashim, K., Tahiruddin, S., & Asis, A. J. (2012). 8 – Palm and Palm Kernel Oil Production and Processing in Malaysia and Indonesia. *Palm Oil*, 2008, 235–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50011-3>

Hossain, M. A., Jewaratnam, J., & Ganesan, P. (2016). Prospect of hydrogen production from oil palm biomass by thermochemical process, A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), 16637–16655.

Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, 39(x), 109–143. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>

Hurskainen, M., & Vainikka, P. (2015). Technology options for large-scale solid-fuel combustion. In *Fuel Flexible Energy Generation*.

Husain, Z., Zainal, Z. A., & Abdullah, M. Z. (2002). Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. *Biomass and Bioenergy*, 24(2), 117–124. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00101-0)

Idris, S. S., Rahman, N. A., & Ismail, K. (2012). Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*, 123, 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.065>

Index Mundi. (2019). Palm Oil Production by Country in 1000 MT. Retrieved October 11, 2019, from <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=palm-oil>

IRENA. (2018). International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2017. In International Renewable Energy Agency.

Loh, S. K. (2016). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.081>

Malico, I., Nepomuceno Pereira, R., Gonçalves, A. C., & Sousa, A. M. O. (2019). Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112 (November 2018), 960–977. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022>

Mba, O. I., Dumont, M. J., & Ngadi, M. (2015). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry – A review. *Food Bioscience*, 10, 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.01.003>

Minagricultura, & UPRA. (2017). Colombia: 16 millones de hectáreas aptas para palma de aceite. Retrieved May 15, 2020, from Palma de aceite website: [https://www.upra.gov.co/sala-de-prensa/noticias/-/asset\\_publisher/GEKyUuxHYSXZ/content/colombia-16-millones-de-hectareas-aptas-para-palma-de-aceite](https://www.upra.gov.co/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/GEKyUuxHYSXZ/content/colombia-16-millones-de-hectareas-aptas-para-palma-de-aceite)

Mohammed, M. A. A., Salmiaton, A., Wan Azlina, W. A. K. G., & Mohamad Amran, M. S. (2012). Gasification of oil palm empty fruit bunches: A characterization and kinetic study. *Bioresource Technology*, 110, 628–636. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.056>

Monroy, E. F. C. (2007). Integración energética en el proceso de extracción de aceite de palma. 28, 93–104.

Montero V, J. C., Díaz R, C. A., Guevara T, F. E., Cepeda R, A. H., & Barrera H, J. C. (2013). Modelo para medición de eficiencia real de producción y administración integrada de información en Planta de Beneficio Producción. In *Boletín técnico* No. 33.

Nanda, S., Mohammad, J., Reddy, S. N., Kozinski, J. A., & Dalai, A. K. (2014). Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 4(2), 157–191. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>



Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2014). Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 85, 800–808. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.054>

Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2015). Combustion of an oil palm residue with elevated potassium content in a fluidizedbed combustor using alternative bed materials for preventing bed agglomeration. *Bioresource Technology*, 182, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.128>

Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2016). A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. *Applied Energy*, 176, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.063>

Ramirez-Contreras, N. E., Arévalo S, A., & Garcia-Nuñez, J. A. (2015). Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia. *Revista Palmas*, 36(4), 41–54. Retrieved from <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11644/11636>

Ramirez-Contreras, N. E., Munar-Florez, D. A., Garcia-Nuñez, J. A., Mosquera-Montoya, M., & Faaij, A. P. C. (2020). The GHG emissions and economic performance of the Colombian palm oil sector; current status and long-term perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>

Ramirez-Contreras, N. E., Ramírez, Á. S. S., González, E. M. G., & Yañez A., E. E. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. *Boletín Técnico No. 30*, (30), 1–46. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3582>

Rincon Martinez, J. M., & Silva Lora, E. E. (2015). Bioenergía: Fuentes, conversion y sostenibilidad. Rivera-Méndez, Y. D., Rodríguez, D. T., & Romero, H. M. (2017). Carbon footprint of the production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fresh fruit bunches in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 149, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.149>

Samiran, N. A., Jaafar, M. N. M., Ng, J. H., Lam, S. S., & Chong, C. T. (2016). Progress in biomass gasification technique – With focus on Malaysian palm biomass for syngas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1047–1062. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.049>

Shafie, S. M., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Ahmad-Yazid, A. (2012). A review on electricity generation based on biomass residue in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5879–5889. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.031>

Sikarwar, V. S., & Zhao, M. (2017). Biomass Gasification. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10533-0>

SISPA. (2019). Evolución histórica anual del fruto procesado, el aceite de palma y el palmiste extraídos. Retrieved from <http://sispa.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/produccion>

Sokhansanj, S. (2011). The Effect of Moisture on Heating Values. Biomass Energy Data Book, (C), 1–5. Retrieved from <http://cta.ornl.gov/bedb>

Sommart, K., & Pipatmanomai, S. (2011). Assessment and Improvement of Energy Utilization in Crude Palm Oil Mill. 10, 161–166.

Strzalka, R., Schneider, D., & Eicker, U. (2017). Current status of bioenergy technologies in Germany. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 801–820. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.091>

Taylor, G. (2008). Biofuels and the biorefinery concept. Energy Policy, 36(12), 4406–4409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.069>

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2018). Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia. Retrieved from [http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion\\_Demanda\\_Energia\\_Electrica\\_Octubre2015.pdf](http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion_Demanda_Energia_Electrica_Octubre2015.pdf)

USDA. (2018). Oilseeds: World Markets and Trade.

Van Loo, S. (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring.

Wambeck, N. (1999). Sinopsis del proceso de la palma de aceite. 107.

Wolf, J. P., & Dong. (2013). 1 – Biomass combustion for power generation: an introduction. In Biomass Combustion Science, Technology and Engineering. <https://doi.org/10.1533/9780857097439.1.3>

De la Peña, Y., Bordeth, G., Campo, H., & Murillo, U. (2018). Energías limpias: una oportunidad para salvar el planeta. IJMSOR: Revista Internacional de Ciencias de la Gestión e Investigación de Operaciones, 3(1), 21-25. Obtenido de <http://ijmsoridi.com/index.php/ijmsor/article/view/91>